

УДК 621.774.2

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.099>

© О.Ю. Лоскутов<sup>1</sup>, В.В. Овсяников<sup>1</sup>, В.В. Проців<sup>2</sup>, В.У. Григоренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ТОВ НВП з П «УКРТРУБОІЗОЛ», Меліоративне, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ПРОЦЕС ЕКСПАНДУВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ ВИРОБНИЦТВА ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРА ДЛЯ МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТО- І ГАЗОПРОВІДІВ ТА МЕТАЛОЗНАВЧІ АСПЕКТИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

© O. Loskutov<sup>1</sup>, V. Ovsyanikov<sup>1</sup>, V. Protsiv<sup>2</sup>, V. Hryhorenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UKRTRUBOIZOL LLC, Meliorativne, Ukraine

<sup>2</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## PROCESS OF EXPANSION IN PRODUCTION TECHNOLOGIES OF OF LARGE DIAMETER PIPES FOR MAIN OIL AND GAS PIPELINES AND METAL SCIENTIFIC ASPECTS OF ITS USE

**Мета.** Метою публікації є представлення уявлень про процес експандування та про металознавчі аспекти його використання.

**Методика.** В останні роки в Україні були створені і працюють підприємства з виробництва зварних труб великих діаметрів. Переважно, це виробництво труб за ГОСТ 10704-91, ГОСТ 10705-80, ГОСТ 10706-76, де не передбачено використання експандування. Після зупинки Харцизького трубного заводу (що залишився на тимчасово окупованій території) з'явилися потреби в трубах для магістральних нафто- та газопроводів за ГОСТ 20295, ДСТУ ISO 3183:2017 і за іншими стандартами і нормами, де використовують експандування, оскільки проведення додаткової термічної обробки труб великого діаметру вимагає будівництва термічних цехів з печами великих розмірів. Це значні додаткові капіталовкладення. Експлуатація таких агрегатів збільшить вартість готової продукції у зв'язку з великою вартістю енергоносіїв – газу та/або електроенергії.

**Результати.** У 2019-2020 рр. на підприємстві з іноземними інвестиціями ТОВ НВП «Укртрубоізол» встановлена і введена в експлуатацію нова сучасна лінія з виробництва сталевих прямошовних труб діаметром від 406,4 мм до 1422 мм. Налагоджено випуск труб за ГОСТ 10704-91, ГОСТ 10705-80, ГОСТ 10706-76 діаметром від 426 мм до 1420 мм зі стінками товщиною від 6 мм до 24 мм включно.

З червня 2021 ведеться монтаж нового гідромеханічного експандера. Після закінчення цієї процедури, лінія буде оснащена сучасним обладнанням для повного технологічного циклу виробництва труб великого діаметру (ТВД) для магістральних нафто- і газопроводів за ГОСТ 20295 зі сталі класу міцності від К34 до К60, ДСТУ ISO 3183:2017 і за іншими стандартами і нормами.

Визначені межі коефіцієнт пластичної деформації, що виникає під час експандування труб на обладнання, яке буде використовуватися.

**Наукова новизна.** До основних металознавчих аспектів процесу експандування слід віднести особливості, пов'язані з пружними і пластичними деформаціями та залишковими напруженнями в металі, а також з питаннями якості зварного шва.

**Практична значимість.** Обґрунтована потреба проведення процедури експандування прямошовних зварних труб великого діаметру, що не пройшли додаткову термічну обробку.

**Ключові слова:** системи трубопровідного транспорту, труби великого діаметру, формування, зварювання, експандування, залишкові напруження, технологічне обладнання, нормативна документація, надійність нафтогазотранспортної системи, пружна та пластична деформація, збільшення діаметра труб.

**Вступ.** Магістральні нафто- і газопроводи є небезпечними техногенними об'єктами. Це визначає високий рівень технічних вимог до технологій виробництва нафто- газопровідних труб великого діаметру (ТВД), що працюють під тиском. Для забезпечення високих технічних вимог до таких труб створені сучасні виробництва з повним технологічним циклом і зі спеціалізованим обладнанням. В Україні у даний час не працюють сучасні спеціалізовані виробництва нафто- і газопровідних труб великого діаметру.

Для будівництва систем трубопроводів, нафтогазотранспортна промисловість застосовує зварні прямошовні труби великого діаметру (ТВД). Системи трубопровідного транспорту відносяться до небезпечних техногенних об'єктів [1]. До магістральних трубопроводів висувають високі вимоги щодо забезпечення надійності та безпеки. Важливу роль при цьому відіграють комплекс міцнісних і в'язкісних властивостей як основного металу, так і зварних з'єднань труб [2], їх геометричні параметри, що визначають довговічність і надійність нафтогазотранспортної системи. Забезпечення комплексу технічних вимог, що пред'являються для ТВД, вимагає організацію технології їх виготовлення на спеціалізованому промисловому устаткуванні.

Відомі такі процеси формування труб, що використовують у виробництві ТВД:

- пресове формування (UOE-процес);
- валкове формування (RBE-процес),
- крокове на пресі формування (JSOE-процес) [3].

Для забезпечення вимог з надійності зварних нафтогазопровідних ТВД, сучасна нормативна документація (ДСТУ ISO 3183:2017 (ISO 3183:2012, IDT), API Spec 5L, СТО Газпром 2-4.1-713-2013, ГОСТ 20295-85, СНиП 2.05.06-85, ГОСТ 31447-2012) [5-10] регламентує проведення технологічної операції збільшення в холодному стані діаметра труби із швом – експандування. Збільшення діаметру здійснюється покроково уздовж всієї труби на гідромеханічному експандері.

Під час експандування здійснюють подачу каліброваного інструмента експандера всередину труби на певну довжину (крок), роздавання (розтягування) зсередини назовні уздовж цієї ділянки за допомогою каліброваного інструменту, зняття зусилля експандування і подачу інструменту на наступний крок (рис. 1).

У результаті тиску інструменту експандера на внутрішню поверхню труби, в стінці труби виникають тангенціальні напруження, що діють перпендикулярно площі повздовжнього перерізу стінки труби. Відбувається пластична деформація розтягування металу по периметру труби. Причому збільшується діаметр труби.

**Основна частина.** Особливість процесу експандування ТВД на гідромеханічних експандерах полягає в тому, що зварений шов розташовують у спеціальній виїмці на верхній точці інструменту. Це роблять для того, щоб зварний шов не піддаватися деформації (рис.) [4].

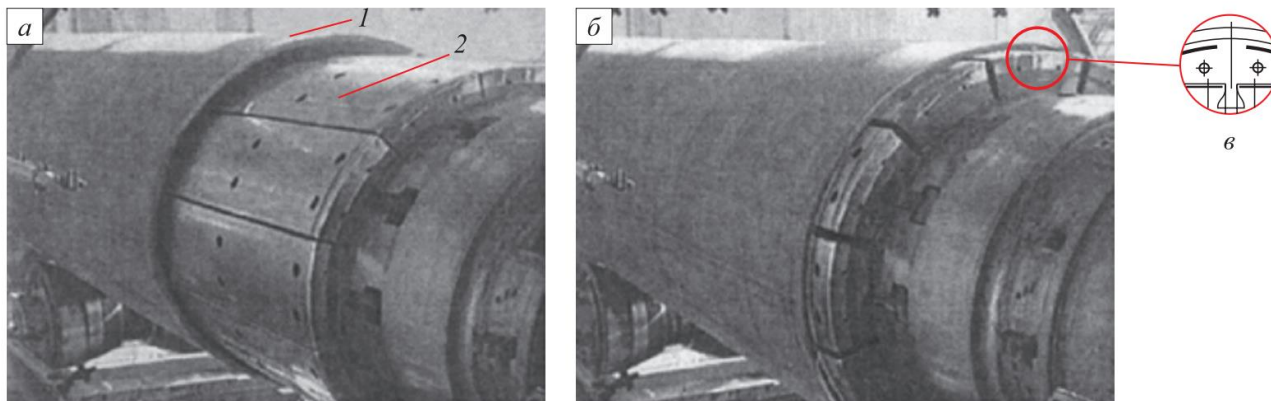


Рис. Загальний вигляд ТВД в експандері [2]: *а* – підготовка труби до операції; *б* – операція експандування; *в* – розташування зварного шва; 1 – передній кінець труби; 2 – головка експандера

Нижче представлений далеко не повний ряд провідних світових виробників ТВД, які застосовують в технологічному процесі операцію експандування:

– Харцизький трубний завод, (Україна, тимчасово неконтрольована територія);

– Berg Steel Pipe Corporation (США);

– Salzgitter Mannesmann GmbH, Europipe (Німеччина, Франція);

– EEW-Bergrohr GmbH (Німеччина);

– Cimolai (Італія);

– Hi-Steel (Корея);

– Umran (Туреччина);

– Julong / P.R. (Китай);

– Загорський трубний завод (Росія);

– Волзький трубний завод (Росія);

– Іжорський трубний завод (Росія);

– Челябінський трубопрокатний завод (Росія);

– Вискунський трубний завод (Росія).

Таким чином, світова практика виробництва прямошовних ТВД для магістральних трубопроводів свідчить, що експандування – це невід’ємна операція технологічного процесу виготовлення.

Зупинка ПрАТ «Харцизький трубний завод» у 2014 році призвела до дефіциту ТВД в Україні. На сьогодні серед діючих підприємств України немає трубних заводів, що виготовляють для магістральних трубопроводів зварні нафто- і газопровідні прямошовні труби великого діаметру за технологією з повним технологічним циклом, яка включає експандування.

Роботу в цьому напрямку веде підприємство з іноземними інвестиціями ТОВ НВП «Укртрубоізол». У 2019-2020 рр. проведено реконструкцію. Встановлена і введена в експлуатацію нова лінія з виробництва сталевих прямошовних труб діаметром від 406,4 мм до 1422 мм зі сталі класу міцності від К34 до К60. До 2021 року в зв'язку з відсутністю експандера, виробляли тільки труби за ГОСТ 10704-91, ГОСТ 10705-80, ГОСТ 10706-76, так як виробництво нафто- і газопровідних ТВД відповідального призначення для магістральних трубопроводів без проведення експандування – грубе порушення вимог стандартів, норм і правил [5–11].

З червня 2021 р. ТОВ НВП «Укртрубоізол» має у своєму розпорядженні новий сучасний експандер. Після закінчення монтажу преса підприємство буде оснащено сучасним обладнанням повного технологічного циклу виробництва ТВД для магістральних нафто- і газопроводів за ГОСТ 20295 зі сталі класу міцності від К34 до К60, ДСТУ ISO 3183:2017.

Сучасні експандери є складним і дорогим технологічним обладнанням, але дозволяють забезпечувати максимальну рівномірність розподілу деформуючого зусилля уздовж периметру і довжини заготовки з обов'язковим регламентованим збільшенням діаметра труби відповідно до остаточної деформації розтягування периметру труби.

Відповідно до вимог пунктів 8.3 та 8.9 ДСТУ ISO 3183: 2017 і API Spec 5L, якщо метал звареної труби не був підданий нормалізації, загартуванню та відпуску або подальшій термообробці, то має бути проведене експандування. При цьому відносно обтиснення за середнім зовнішнім діаметром труби (за термінологією API Spec 5L коефіцієнт пластичної деформації  $s_\gamma$ ) має знаходитися в межах від 0,003 до 0,015 включно [5].

Значення коефіцієнту  $s_\gamma$  розраховується за такою формулою [5, 6, 7]:

$$s_\gamma = \frac{|D_a - D_b|}{D_b}, \quad (1)$$

де  $D_a$  – зовнішній діаметр після деформації, що задається виробником, мм;  $D_b$  – зовнішній діаметр до деформації, що задається виробником, мм;  $|D_a - D_b|$  – абсолютне значення різниці зовнішніх діаметрів до і після експандування, мм.

Для одного і того ж розміру труб, виготовлених з експандуванням і без нього, ширина товстолистового прокату буде різною.

Для експандованих труб ширина листа визначається за формулою:

$$B = \pi ((D_a - S) / (1 + s_\gamma)), \quad (2)$$

де  $\pi = 3,1416$ ;  $B$  – ширина листа, мм;  $S$  – товщина стінки труби, мм.

Наприклад, для труби розміром 1020×16 мм з відносною холодною деформацією розтягування зовнішнього периметра 0,8 %, ширина листа складе 3129 мм, а в разі отримання труби без експандування – 3154 мм.

Таким чином, шляхом пластичної деформації по всій поверхні труби відбувається збільшення периметра труби аж до досягнення її заданого діаметра.

У технічній літературі представлений великий спектр робіт, пов'язаних з металознавчими питаннями експандування [1–4, 12–14]. Питання стосуються в основному і в різній мірі наступного:

- нерівномірності механічних властивостей металу по об'єму листа;
- нерівномірності товщини стінки за площею листа;
- залишкових напружень по об'єму листа після гарячої прокатки й охолодження;
- величин тангенціальних напружень, що виникають при формуванні труби;
- величин залишкових тангенціальних напружень в металі під час розвантаження і після зняття зусилля формування (гибки);
- величин тангенціальних напружень, що виникають в металі труби при експандуванні, як суми залишкових напружень під час розвантаження і після зняття зусилля формування і від напруження роздачі під час експандування;
- величин залишкових внутрішніх тангенціальних напружень в металі труб після зняття навантаження експандування і, відповідно, розвантаження металу;
- величини тангенціальних напружень в металі труби під час експандування;
- визначення робочих тангенціальних напружень в металі труби від тиску середовища, що транспортується, з урахуванням нерівномірності механічних властивостей металу об'єму листа, нерівномірності товщини стінки за площею листа, залишкових напружень по об'єму листа після гарячої прокатки й охолодження і величин залишкових напружень після експандування;
- корозійно-напруженого розтріскування (КРН);
- залишкових напружень в зварному шві і біля шовної зони (зварювальних напружень).

В останні роки з'явився ряд наукових праць з вищевикладених питань. Особливо слід відмітити роботи, що дають математичні вирази з кількісного розрахунку остаточних і робочих напружень в металі труби. Поява таких наукових праць дозволила створювати комплексний розрахунковий аналіз параметрів напруженого стану металу труб, у тому числі і стосовно експандування. Це, у свою чергу, допомагає технологам, які розробляють технологічні процеси виготовлення нафтогазопровідних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів з кожного типорозміру труб і з відповідної марки сталі.

**Висновки.** Світова практика виробництва прямошовних ТВД для магістральних трубопроводів свідчить – експандування невід'ємна технологічна операція. Виробництво ТВД відповідального призначення без проведення експандування – грубе порушення, що не забезпечує надійність і безпеку магістральних трубопроводів.

Питання організації виробництва нафто- і газопровідних ТВД вимагає усвідомлення відповідальності у забезпеченні необхідного рівня якості з боку всіх

учасників процесу – споживачів, виробників, органів оцінки відповідності продукції законодавчим вимогам, органів державного контролю, наукових і проектних організацій.

До основних металознавчих аспектів процесу експандування слід віднести особливості, пов'язані з пружними і пластичними деформаціями та залишковими напруженнями в металі, а також з питаннями якості зварного шва, що виникають під час експандування труб.

#### Перелік посилань

1. Мазур, И.И., & Иванцов, О.М. (2004). *Безопасность трубопроводных систем*.
2. Рыбаков, А.А., Филиппчук, Т.Н., & Гончаренко, Л.В. (2013). Трещины в сварных соединениях труб большого диаметра и меры их предупреждения. *Автоматическая сварка*, 4, 16-22.
3. Шевакин, Ю.Ф., Коликов, А.П., & Райков, Ю.Н. (2005). *Производство труб*. Интернет. Инжиниринг.
4. Коликов, А.П., Звонарев, Д.Ю., & Галимов, М.Р. (2017). Оценка напряженно-деформированного состояния металла на основе математического моделирования при производстве труб большого диаметра. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 60(9), 706-712.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-9-706-712>
5. *ДСТУ ISO 3183:2017 Нафтова та газова промисловість. Труби сталеві для трубопровідних транспортних систем (ISO 3183:2012, IDT)*. (2017).
6. *API Spec 5L Line Pipe, Forty-Sixth Edition*. (n.d.)
7. *СТО Газпром 2-4.1-713-2013 Технические требования к трубам и соединительным деталям*. (2013).
8. *ГОСТ 20295-85 Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. Технические условия*. (1985).
9. *СНиП 2.05.06-85\* Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы*. (1985).
10. *ГОСТ 31447-2012 Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Технические условия*. (2012).
11. *Технический регламент оборудования, работающего под давлением ПКМУ от 16.01.2019. № 27*. (2019).
12. Шинкин, В.Н., & Коликов, А.П. (2011). Технологические расчеты процессов производства труб большого диаметра по технологии SMS Meer. *Металлург*, 11, 77–81.
13. Эфрон, Л.И. (2012). *Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали*. Металлургиздат.
14. Шинкин, В. Н., Коликов, А. П., & Мокроусов, В. И. (2012). Расчет максимальных напряжений в стенке трубы при экспандировании с учетом остаточных напряжений заготовки после трубоформовочного пресса SMS Meer. *Производство проката*, 7, 25-29.

#### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Целью публикации является представление основных положений про процесс экспандирования и про металлургические аспекты его использования.

**Методика.** В последние годы в Украине были созданы и работают предприятия по производству сварных труб больших диаметров. Преимущественно, это производство труб по ГОСТ 10704-91, ГОСТ 10705-80, ГОСТ 10706-76, где не предусмотрено использование экспан-

дирования. После остановки Харцизского трубного завода (что остался на временно оккупированной территории) появились потребности в трубах для магистральных нефте- и газопроводов по ГОСТ 20295, DSTU ISO 3183:2017 и по другим стандартам и нормам, где используют экспандирование, поскольку проведение дополнительной термической обработки труб большого диаметра требует строительства термических цехов с печами больших размеров. Это значительные дополнительные капиталовложения. Эксплуатация таких агрегатов увеличит стоимость готовой продукции в связи с большой стоимостью энергоносителей – газа и / или электроэнергии.

**Результаты.** В 2019-2020 гг. На предприятии с иностранными инвестициями ООО НПП «Укртрубоизол» установлена и введена в эксплуатацию новая современная линия по производству стальных прямошовных труб диаметром от 406,4 мм до 1422 мм. Налажен выпуск труб по ГОСТ 10704-91, ГОСТ 10705-80, ГОСТ 10706-76 диаметром от 426 мм до 1420 мм со стенками толщиной от 6 мм до 24 мм включительно.

С июня 2021 ведется монтаж нового гидромеханического экспандера. После окончания этой процедуры, линия будет оснащена современным оборудованием для полного технологического цикла производства труб большого диаметра (ТБД) для магистральных нефте- и газопроводов по ГОСТ 20295 из стали класса прочности от К34 до К60, DSTU ISO 3183:2017 и по другим стандартам и нормам.

Определены границы коэффициента пластической деформации, возникающей при экспандировании труб на оборудовании, которое будет использоваться.

**Научная новизна.** К основным металловедческим аспектам процесса экспандирования следует отнести особенности, связанные с упругими и пластическими деформациями и остаточными напряжениями в металле, а также с вопросами качества сварного шва.

**Практическая значимость.** Обоснована необходимость проведения процедуры экспандирования прямошовных сварных труб большого диаметра, если они не прошли дополнительную термическую обработку.

**Ключевые слова:** системы трубопроводного транспорта, трубы большого диаметра, формирование, сварки, экспандирование, остаточные напряжения, технологическое оборудование, нормативная документация, надежность нефтегазотранспортной системы, упругая и пластическая деформация, увеличение диаметра труб.

#### ABSTRACT

**Purpose.** The purpose of the publication is to present the main provisions about the expansion process and about the metallurgical aspects of its use.

**The methods.** In recent years, enterprises for the production of large diameter welded pipes have been established and are operating in Ukraine. Mainly, this is the production of pipes according to GOST 10704-91, GOST 10705-80, GOST 10706-76, where the use of expansion is not provided. After the shutdown of the Khartsyzsk Pipe Plant (which remained in the temporarily occupied territory) there was a need for pipes for main oil and gas pipelines according to GOST 20295, DSTU ISO 3183: 2017 and other standards and norms where expansion is used, as additional heat treatment of large pipes diameter requires the construction of thermal shops with large furnaces. This is a significant additional investment. The operation of such units will increase the cost of finished products due to the high cost of energy – gas and / or electricity.

**Findings.** In 2019-2020 the enterprise with foreign investments of LLC NPP "Ukrtrubozol" has installed and put into operation a new modern line for the production of steel straight-seam pipes with

a diameter of 406.4 mm to 1422 mm. Production of pipes according to GOST 10704-91, GOST 10705-80, GOST 10706-76 with a diameter from 426 mm to 1420 mm with walls from 6 mm to 24 mm thick inclusive is adjusted.

From June 2021, a new hydromechanical expander is being installed. After completion of this procedure, the line will be equipped with modern equipment for the full technological cycle of production of large diameter pipes (TBD) for main oil and gas pipelines according to GOST 20295 from steel of strength class K34 to K60, DSTU ISO 3183: 2017 and other standards and norms.

The limits of the coefficient of plastic deformation that occurs during the expansion of pipes on the equipment to be used are determined.

**The originality.** The main metallurgical aspects of the expansion process include features related to elastic and plastic deformations and residual stresses in the metal, as well as issues of weld quality.

**Practical implementation.** The necessity of carrying out the procedure of expansion of large-diameter straight-seam welded pipes is substantiated, if they have not undergone additional heat treatment.

**Keywords:** *pipeline transport systems, large diameter pipes, forming, welding, expansion, residual stresses, technological equipment, regulatory documentation, reliability of oil and gas transportation system, elastic and plastic deformation, increase in pipe diameter.*